

Agroecología 7: 19-34, 2012

# EL SUELO, SU METABOLISMO, CICLAJE DE NUTRIENTES Y PRÁCTICAS AGROECOLÓGICAS

**Marina Sánchez De P, Martín Prager M, Rubén E Naranjo, Oscar E Sanclemente**

*Grupo de Investigación en Agroecología, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Carrera 32 vía Candelaria, Palmira, Valle del Cauca, Colombia, PBX (57) (2) 2717000 Ext.35745-35736, E-mail: agroecologia@palmira.unal.edu.co*

## Resumen

Se hace una aproximación del suelo como sistema viviente y su participación en la sostenibilidad de los agroecosistemas. Altieri (2010) identifica a la calidad del suelo y a la biodiversidad arriba y abajo del suelo como pilares para la conversión de sistemas convencionales de producción (caracterizados por monocultivos y dependencia de insumos de síntesis industrial) hacia sistemas diversificados y autosuficientes.

El patrón de organización, estructura y procesos que caracterizan al suelo bajo el enfoque sistémico, justifican cómo este sistema, del cual hacen parte las plantas y demás organismos, aporta los nutrientes que ellos requieren y, éstos a su vez, integran al sistema biomasa viva y no viva, que se recicla en un continuum que del suelo trasciende a la atmósfera, en forma de moléculas y gases como el  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , denominados gases con efecto invernadero (GEI) y otros como el  $\text{H}_2\text{S}$ , involucrado en la lluvia ácida.

La visión de redes dentro de redes y procesos contextuales aproxima la fertilidad, productividad, resiliencia, salud y calidad del suelo como propiedades emergentes, explicables desde el todo del agroecosistema. Prácticas como la conservación y uso de la materia orgánica, la labranza mínima o cero, la biodiversidad y la organización de agroecosistemas complejos, tienen sus bases científicas en el entramado de redes que se entretajan arriba y abajo, trascienden al agroecosistema y al ecosistema. De allí la necesidad que estas prácticas agroecológicas se generalicen y abarquen lo local, regional y territorial, a través de trabajos en redes sociales, económicas y políticas.

**Palabras clave:** El sistema suelo, ciclaje de nutrientes, biodiversidad, prácticas agroecológicas, fertilidad, calidad del suelo

## Summary

### The soil, its metabolism, nutrients cycling and agroecological practices.

The approach is to look the soil as a living system and to ground its participation in the agro ecosystem sustainability. It goes from Altieri's premise that identifies soil quality and biodiversity up and down the soil as pillars to get the change of the conventional production systems (characterized by monocultures and dependence of industrial synthesis ingredients) through diversified and self-sufficient systems.

It comes the organization pattern analysis, structure and processes which characterized the soil and under the systemic approach, it justifies how this system from which the plants make part of, and the rest of the organisms, gives the nutrients for their requirements, and those also form the living and no living biomass system, which is recycled continuously transforming in a permanent way the webs and soil components, traveling to the atmosphere as molecules and gases like  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , named "green house" effect gases (GHEG) and others like  $\text{H}_2\text{S}$ , involved in the acid rain.

The systemic vision of webs within webs and context processes take us to fertility, resilience, and health and soil quality as emerging properties, only explainable from the whole agro ecosystem. Some agro ecological practices like the preservation and use of the organic matter, zero or minimal tillage and the biodiversity (with its connections up-down and down-up) same as the organization of the complex agro ecosystems, have their scientific base on the web framework which is weaved around of the components and go beyond the ecosystem and the agro eco-

system. Therefore, the need of those agro ecological practices become widespread, covering the local, regional and territorial, through the social, economic and political networks.

**Key words:** The soil system, the nutrient recycling, biodiversity, agroecological practices, fertility, soil quality.

“Según la teoría Gaia de James Lovelock y Lynn Margulis, la evolución de los primeros organismos vivos fue pareja a la transformación de la superficie del planeta de un medio inorgánico a una biosfera que se autorregula” (Capra 2003a).

## INTRODUCCIÓN

Altieri (2010) sostiene: “La Agroecología se perfila hoy como la ciencia fundamental para orientar la conversión de sistemas convencionales de producción (monocultivos dependientes de insumos de síntesis agroquímica) a sistemas más diversificados y autosuficientes”. Precisa que esta conversión requiere de dos pilares sobre los cuales trabajar con miras al cambio: 1) La calidad del suelo, y, 2) la biodiversidad arriba y abajo del suelo, en espacio y tiempo.

La identificación con este planteamiento nos condujo a reflexionar en este escrito, sobre estos pilares, centrándonos, aparentemente, en el primero: la calidad del suelo. Sin embargo, el desarrollo de las ideas mostrará que, dentro de un enfoque sistémico, uno y otro pilar son inseparables, pues la calidad del suelo está íntimamente ligada a la biodiversidad aérea y subterránea.

La adopción del enfoque sistémico nos lleva a asumir la comprensión del sistema vivo llamado suelo, su calidad y biodiversidad como una aproximación, a enfatizar en la conectividad de las partes a través de relaciones en redes, a detenernos en lo contextual, en lo procesal y a considerar la dimensión ambiental y social del sistema suelo.

## EL SISTEMA VIVO LLAMADO SUELO

El suelo comparte las características de los sistemas vivientes:

- **Posee un patrón organizativo cerrado que se manifiesta en una estructura**

Este patrón organizativo surge del conjunto que hemos llamado estructura del suelo, con redes metabólicas y autopoéticas que aseguran su autoorganización, autogeneración y autorreproducción, en un entorno, en espacio y tiempo específicos (Capra 2003a).

En términos de Edafología, la estructura del suelo se ha considerado resultado de la interacción del material parental constituido por minerales primarios o formados por cristalización, los cuales, al degradarse originan los minerales secundarios: arenas, limos y arcillas, quienes junto con la acumulación de la materia orgánica

en sus diferentes manifestaciones (biota y los restos orgánicos) propician la presencia y disponibilidad de nutrientes, de agua y un ambiente atmosférico con manifestaciones micro y macroscópicas.

Como resultado de la acción integrada de procesos físicos, químicos y biológicos sobre las arenas, limos y arcillas, unidos a la materia orgánica viva y muerta, se originan los agregados del suelo, los cuales adquieren cohesión interna y externa, se estabilizan y presentan durabilidad. La agregación del suelo, permite que se generen poros por donde circula el agua lateral y verticalmente, el aire, los nutrientes, los gases, es decir, las condiciones que se requieren para la vida (Sánchez de P 2007a).

Autores como Tisdall y Oades (1982), separan la estabilidad de los agregados en permanente, (ligada a la presencia de cationes multivalentes, que originan puentes químicos y unen con fuerza las arcillas, con la materia orgánica, los limos, las arenas y los microorganismos y dan alta resistencia y estabilidad al agregado) y temporal, mediada por agentes agregantes transitorios (como la acción de raíces y microorganismos). La visión sistémica y algunos resultados de investigación nos llevan a considerar dicha estructura como un todo, dentro de las posibilidades determinadas por el entorno y el desarrollo histórico del suelo (Torres *et al.* 2007, Reyes *et al.* 2007).

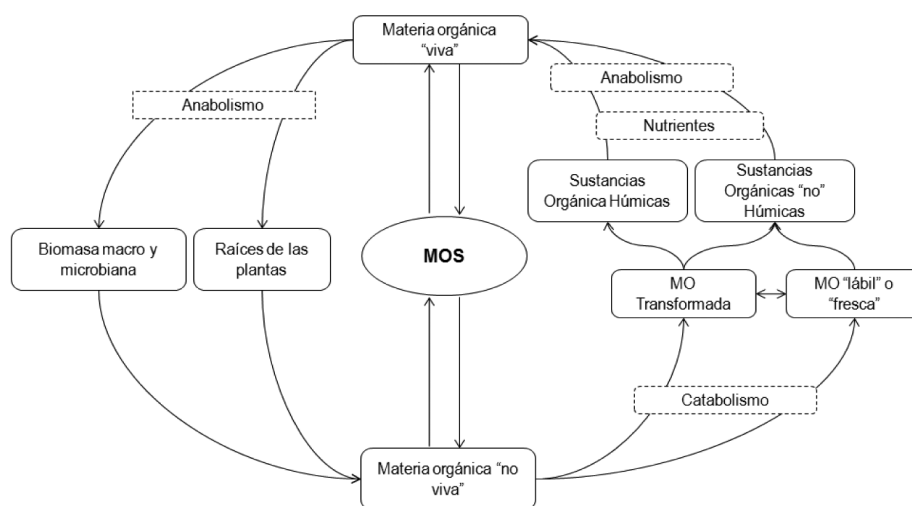
- **El suelo es un sistema abierto en constante interacción con el entorno para la provisión de materia y energía y más...**

Esa “manifestación física de organización” que implica el surgimiento de la estructura en el suelo, expresada en una propiedad como la agregación (Fig. 1) no se puede concebir en forma aislada de su interacción constante con el entorno, en un largo proceso evolutivo.

Supongamos la presencia de rocas y fragmentos como proveedores de energía. Sin embargo, su transformación en materiales secundarios (arenas, arcillas, limos), requiere de condiciones ambientales y de organismos que obtengan su energía de dicha fuente. Un ejemplo clásico, lo constituye la presencia de líquenes sobre el material parental, quienes a través de sus ácidos, son capaces de crear condiciones para desintegrar rocas o fragmentos rocosos para obtener nutrientes y energía. Actualmente, hay evidencias abundantes del efecto de los organismos, en especial, los microorganismos en procesos de degradación de materiales minerales muy estables, lo cual, sucede cotidianamente en el suelo (Marschner 1995, Patiño 2010).



**Figura 1.** La organización estructural del suelo se manifiesta en la formación de agregados de diferentes tamaños. Se los considera la unidad básica de estructuración del suelo y se los denomina peds (Sánchez de P. *et al.* 2007).



**Figura 2.** El flujo de la materia orgánica en el suelo. Fuente: Adaptado de Labrador 2001.

Queda claro el surgimiento de la agregación como una propiedad emergente en la cual, lo inorgánico y orgánico se conjugan y entretajan. Así, la aparición de la materia orgánica viva sobre el material parental se puede considerar como componente que marca un hito al propiciar y participar en procesos de organización manifestados en la formación de agregados. Esta materia orgánica viva, al morir y acumularse en desechos, crea nuevos nichos que intervienen, a su vez, sobre la organización estructural del suelo.

#### • La Materia Orgánica

Como elementos protagonistas del lenguaje atómico que da origen a la materia orgánica viva (biomasa), se tienen al C, H y O, los cuales unidos a N, P y S y al  $H_2O$ , constituyen los integrantes comunes de lo vital. Estos átomos se organizan en pequeñas moléculas que se forman a partir de ellos y son la base de la enorme diversidad biológica. Es decir, la diversidad que se expresa en la formación de múltiples moléculas, tiene bases atómicas comunes pero muy diversas en su expresión metabólica y organización (Capra 2003b).

Normalmente hacemos referencia a CHONPS, pero no mencionamos a otros átomos como el Ca, Mg, K, Cu, Zn, Fe, Mn, B, Mo, entre otros, minerales que surgen inicialmente de lo inorgánico y luego se reciclan también a partir de lo orgánico<sup>1</sup>. Así, el proceso de fabricación de biomasa

implica de la presencia de moléculas que caracterizan lo orgánico, con la intervención de minerales sin los cuales no ocurriría la formación de dichas biomoléculas.

La presencia, acumulación de la materia orgánica terrestre y los procesos metabólicos, son elementos clave de la estructura del suelo y están mediados por la actividad de los organismos (macro, meso y microorganismos) y condiciones de entorno, como veremos en la parte concerniente a metabolismo del suelo.

En esta forma, las redes que aseguran los procesos continuos de crecimiento, autorreplicación, autorregulación, automantenimiento, requieren de un flujo que asegure la provisión constante de materia y energía, lo cual le confiere al suelo la característica de sistema abierto, en equilibrio fluyente.

La materia orgánica circula por diferentes y complementarios compartimentos: materia orgánica viva, materia orgánica no viva y humus (Fig. 2). La primera, acompleja los átomos, las moléculas y al hacer la captura de carbono, estabiliza y retiene estas moléculas en tiempos largos, medios o cortos. La materia orgánica no viva, devuelve al sistema, en forma gradual los átomos y moléculas retenidos y dentro de esa gradualidad, deja reservas en el suelo: el humus, que torna al sistema en un tiempo más largo, en condiciones de equilibrio dinámico.

#### • Las redes metabólicas aseguran el automantenimiento como característica inherente a la vida

La conceptualización del suelo como sistema viviente está estrechamente ligada al proceso evolutivo de la corteza terrestre y al surgimiento de los organismos. Aunque se ha registrado que la formación de la tierra data de hace más de 4.500 millones de años, el surgimiento de las

<sup>1</sup> Estos minerales independiente que provengan de lo orgánico o inorgánico pasan a formar parte de diferentes moléculas orgánicas y también hacen parte de las enzimas en calidad de cofactores, hasta el punto que su deficiencia puede inhibir una acción enzimática específica que frena un proceso metabólico también específico.

primeras células bacterianas, la organización celular más sencilla que conocemos, se remonta a 3.500 millones de años (3.500.000.000), con sus necesidades como sistema viviente, de intercambio permanente de materia y energía. Allí se inician las primeras estrategias para desarrollar caminos metabólicos que permitieron obtener alimento y energía de un entorno desfavorable.

Aparentemente, las primeras vías metabólicas utilizadas fueron la fermentación, que permitía utilizar los "elementos químicos de la tierra, del barro, el agua, protegidos de la dura luz solar" y generar energía (ATP) y biomasa, y, la fotosíntesis anoxigénica que permitía hacer uso de la energía del sol y/o generada a partir de gases como el  $H_2S$  para los procesos celulares (Sánchez de P *et al.* 2000). Algunas de estas bacterias fermentadoras eran capaces de suplir sus necesidades de N, elemento fundamental para la síntesis de proteínas, de ATP, ADN y ARN, entre otros, a través de la fijación del  $N_2$  atmosférico, con grandes inversiones de energía.

Así, se mantuvo la vida en ambientes acuáticos, protegida parcialmente de las radiaciones altamente esterilizantes y mutagénicas de la atmósfera terrestre. Transcurrirían aproximadamente 700 millones de años, para que se presentasen bucles catalíticos que dieran origen a la fotosíntesis oxigénica (con la producción de  $O_2$ ). Al generarse sobrantes de  $O_2$  éste se desprendió hacia la atmósfera, se formó la capa protectora mediada por el ozono, y se crearon bucles metabólicos aeróbicos, primero en ambientes coyunturales y luego predominantes que llevaron a que la superficie y atmósfera terrestres pudieran ser colonizadas (hace aproximadamente, 1.500.000.000 de años). Entonces, debieron surgir cambios en los organismos: apareció la locomoción (1.200 millones de años), la reproducción sexual, hace aproximadamente 1.000 millones de años (Capra 2003a).

El  $O_2$  al incrementarse se tornó altamente tóxico para la vida anaerobia predominante y se crearon puntos de inestabilidad que conllevaron el surgimiento de estructuras disipativas como las mitocondrias y cloroplastos (800 millones de años), que propiciaron el salto evolutivo de las células procariotas a las eucariotas como resultado de múltiples simbiosis (Margulis, en Capra 2003a).

Además de resultado del proceso metabólico que generaba posibilidad de nueva forma de obtención de ATP, el  $O_2$  se combinaba con el H que se desprendía a la atmósfera y formaba  $H_2O$ , manteniendo la humedad del planeta y evitando que los océanos se evaporaran. Esta agua se sumó al ciclo hidrológico en su permanente circulación "una y otra vez entre los organismos vivos y el ambiente abiótico" (Odum 1995).

Los procesos metabólicos de la fermentación, la respiración y la fotosíntesis se convirtieron en procesos reguladores del sistema, que permitieron el equilibrio del llamado "invernadero planetario" mediante el balance de gases como el  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $O_2$  y  $H_2$  que propició la co-

lonización del ambiente terrestre y la expansión de la biosfera (Capra 2003a y 2003b).

A la fotosíntesis anoxigénica y oxigénica se la considera "La innovación metabólica más importante de la vida sobre el planeta" (Margulis y Sagan 1986, citados textualmente por Capra 2003a), capaz de producir biomasa suficiente para constituir la fuente primaria de materia y energía para los organismos heterótrofos, incluido el hombre.

Se inició entonces la colonización de la superficie terrestre. El surgimiento de las primeras plantas dotadas de raíces como órganos de exploración constituyó un evento especial (hace unos 500 millones de años). Para hacer más fácil la penetración en el suelo duro y la exploración de un mayor volumen, las plantas acudieron a la estrategia de invertir fotosintatos y originar un entorno llamado rizosfera (Fig. 2). Ese entorno al asegurar alimento, a través de los fotosintatos rizodepositados, se convirtió en sitio privilegiado para la presencia de otros organismos, entre ellos los microorganismos, y generaron el denominado "efecto rizosférico". Dicha rizosfera generó una interfase de intercambio permanente planta-suelo-ambiente, que se manifestó en la agregación y estructuración de la superficie terrestre, el establecimiento de redes metabólicas cada vez más complejas que aceleraron la transformación de la superficie terrestre en suelo vivo (Sánchez de P 2007b).

Otro evento especial lo constituyeron las plantas con flores que aparecieron en los últimos minutos de la evolución de la tierra (aproximadamente 100 millones de años), que diversificó y acomplexó la trama de la vida terrestre, arriba y abajo del suelo. En el proceso evolutivo, los primeros primates aparecieron aproximadamente 4 millones de años atrás y el *Homo sapiens* aproximadamente 250.000 años, es decir, en los últimos campanazos del reloj evolutivo antes de marcar las 24 horas (Capra 2003a).

La evolución de la capa terrestre inerte a suelo vivo sólo se puede explicar dentro del enfoque sistémico, a través de la emergencia de propiedades donde lo inorgánico y orgánico constituyeron componentes novedosos: la aparición de una estructura caracterizada por agregación, redes metabólicas que surgieron unidas a la biodiversidad, que aseguraban flujo continuo de materia y energía, el equilibrio fluyente (homeóstasis) que propiciaba los cambios a la vez que la permanencia del sistema y la cognición del proceso vital.

Las vías metabólicas aprehendidas en ese largo proceso evolutivo, aún permanecen en la actualidad y nos recuerdan las palabras de Morowitz, citado por Capra 2003b: "No obstante la enorme diversidad de tipos biológicos, que incluye millones de especies diferenciadas, la variedad de itinerarios bioquímicos es pequeña, muestra limitaciones y está universalmente distribuida".

Demos bases a esta afirmación, a través de la presentación resumida de las vías metabólicas mediante las cuales los organismos obtienen su energía (ATP), moléculas sencillas (Catabolismo) y luego las ensamblan en los componentes celulares que requieren (Anabolismo).

• **El metabolismo como vía de ciclaje de nutrientes, de obtención de ATP, moléculas simples y ensamblaje en los componentes celulares complejos requeridos por los organismos:**

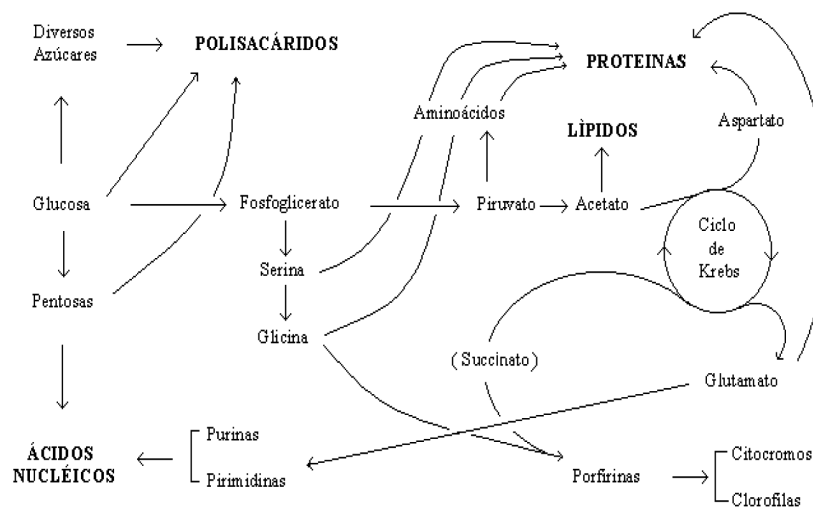
Todos los organismos requieren de energía almacenada temporalmente en un transportador de energía, llamado adenosín trifosfato (ATP), que actúa como "moneda de cambio" reconocida y que se debe gastar rápidamente dentro del sistema. Este ATP lo obtienen los organismos en el catabolismo, en la medida que degradan los sustratos (materia orgánica viva, necromasa y/o los minerales primarios y secundarios), al tiempo que generan moléculas sencillas, que luego ensamblan en moléculas complejas, gastando la energía de enlace (ATP) generada con anterioridad.

Los mecanismos inventados por la naturaleza para obtener ATP y moléculas sencillas para ulterior síntesis, en el largo proceso evolutivo, han sido: fermentación, fotosíntesis anoxigénica, respiración anaeróbica, fotosíntesis oxigénica y respiración aeróbica. Se pueden resumir en cuatro: fermentación, fotosíntesis (en sus diferentes modalidades), respiración anaeróbica y aeró-

bica. El conocimiento de vida en las profundidades marinas y de la tierra, ha originado también el concepto de quimiosíntesis como proceso metabólico, del cual solo mencionamos su existencia.

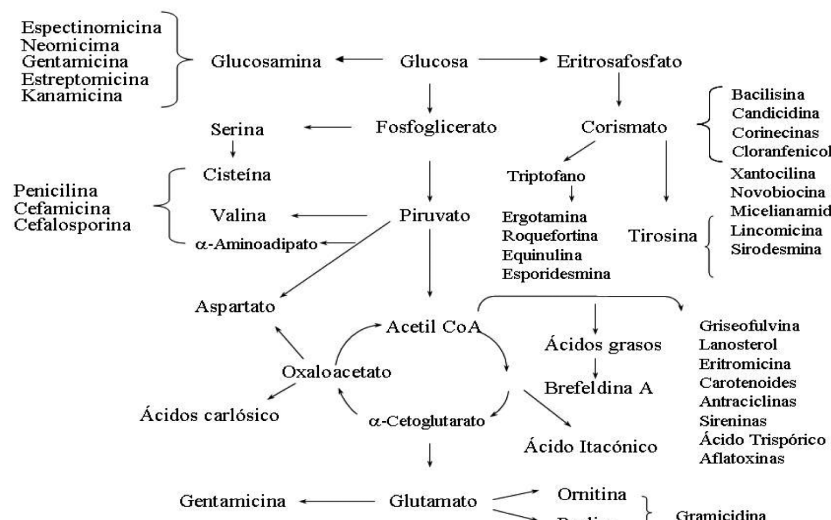
Todas estas estrategias catabólicas (degradativas) involucran procesos de oxido-reducción mediados por catalizadores llamados enzimas, donde se genera un flujo de electrones que requieren de aceptores temporales (los cuales pueden ser externos o internos al proceso), hay un flujo de C que se oxida total ( $\text{CO}_2$ ) o parcialmente (alcoholes, ácidos orgánicos, entre otros), obtención de ATP que se genera y gasta y de agua que se desprende del organismo y pasa al ambiente.

Con el ATP y las moléculas sencillas obtenidas, los organismos realizan sus procesos anabólicos que conducen a la formación de las biomoléculas indispensables para la vida (Fig. 3) (metabolismo primario), y otras que aseguran su permanencia y reproducción en los ambientes que habitan (metabolismo secundario), a través de vías metabólicas que resultan de bifurcaciones, mediadas por enzimas e inventadas a través del proceso evolutivo en las que el sistema puede tomar diferentes direcciones (Fig. 4).



**Figura 3.** El metabolismo como un todo donde las vías catabólicas y anabólicas se complementan. Fuente: FAO 1980 (en Sánchez de P 2003). Metabolismo primario.

### METABOLISMO SECUNDARIO



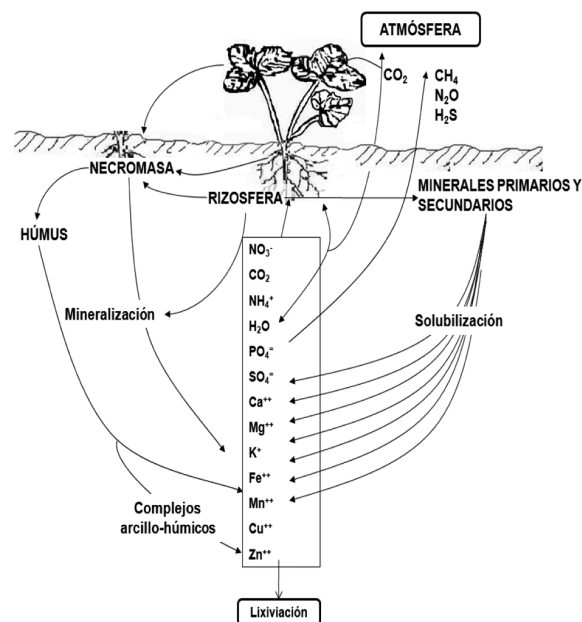
**Figura 4.** Ejemplo de algunos metabolitos requeridos para la comunicación, defensa y reproducción de los organismos, los cuales se generan en vías complementarias y/o alternas a la formación de las biomoléculas fundamentales de los organismos, a través de bucles catalíticos. Fuente: Santana *et al.* (1994)



### • Los procesos metabólicos y el ciclaje de nutrientes en el suelo.

Como se aprecia en la figura 3 el anabolismo (síntesis de moléculas orgánicas) da origen al ensamblaje de las moléculas sencillas en otras más complejas, características de los sistemas vivos: Proteínas, polisacáridos, lípidos y ácidos nucleicos que se concentran en los organismos. Sin embargo cuando esta masa viva, se desprende, es rizodepositada (por ejemplo, en la rizosfera), cumple su ciclo vital, muere y/o sufre rupturas por circunstancias de diferente índole, llega al suelo como necromasa. Esta materia orgánica viva y no viva, nuevamente se metaboliza y así ocurre un ciclaje permanente de los nutrientes, llamado Mineralización.

Ella, en sí misma, es fuente de los nutrientes, al igual, que al actuar, junto con los microorganismos, sobre los minerales primarios y secundarios, deja los minerales disponibles en el suelo a través de un proceso llamado Solubilización (Fig. 5). En este ciclaje permanente, las moléculas productos finales del metabolismo de un organismo, son el sustrato inicial para uno o varios organismos más. También se forman en el suelo y desprenden a la atmósfera, moléculas



**Figura 5.** La mineralización y solubilización como procesos metabólicos que aseguran el ciclaje y disponibilidad de nutrientes en el suelo.

**Tabla 1.** Ejemplos de algunas moléculas orgánicas y minerales presentes en estructuras celulares vegetales, animales y residuos de cosecha, los cuales se incorporan al suelo durante el proceso de mineralización.

Necromasa	Moléculas orgánicas	Minerales	Referencia bibliográfica
Pared celulares vegetales	Celulosa Hemicelulosa Pectina Lignina Suberina Proteínas (prolina, hidroxiprolina, glicina, glucosidasas...)	Ca, P, S, Si	<a href="http://www.colegiomaravillas.com/BIO/BACH/downloads/232paredcelularenvegetales.pdf">http://www.colegiomaravillas.com/BIO/BACH/downloads/232paredcelularenvegetales.pdf</a>
Membranas celulares animales	Fosfolípidos Proteínas	P, Na K	<a href="http://www.iqb.es/cbasicas/farma/farma01/sec01/c1_001.htm">http://www.iqb.es/cbasicas/farma/farma01/sec01/c1_001.htm</a>
Cáscaras de cítricos	Carbohidratos Ácido ascórbico Carotenoides Polifenoles Grasas proteínas	Ca, Mg, Zn,	Rincón <i>et al.</i> 2005.
Hortalizas de hojas	Carbohidratos Lípidos Proteínas Vitaminas A,B, C	Fe, Na, K, Mg y Ca, I, Mn	<a href="http://sites.google.com/site/alimentosynutrientes/bromatologia/verduras-y-hortalizas">http://sites.google.com/site/alimentosynutrientes/bromatologia/verduras-y-hortalizas</a> <a href="http://www.bolivar.udo.edu.ve/biologia/minerales.htm">http://www.bolivar.udo.edu.ve/biologia/minerales.htm</a>
Leguminosas	Carbohidratos Proteínas lípidos	P, S, Cu, Zn, Ca, P, Fe, Mo	<a href="http://sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas_ci/ZootecniaTropical/zt1102/texto/granosdeleguminosas.htm">http://sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas_ci/ZootecniaTropical/zt1102/texto/granosdeleguminosas.htm</a>
Plátano	Carbohidratos Proteína Fibra Vitamina A Vitamina C Ácido fólico, Ácido Pantoténico, A. nicotínico Ac. málico	K, P, Zn, Ca, Na, Mg, Fe, S, Se, Mn, Cu, Cl	<a href="http://colombiamedica.univalle.edu.co/Vol37No1/Cm37n1%20html/Cm37n1a11.htm">http://colombiamedica.univalle.edu.co/Vol37No1/Cm37n1%20html/Cm37n1a11.htm</a>
Gramíneas secas	Celulosa Hemicelulosa Lignina Grasa Proteína	Si, P, K, Ca, Mg	<a href="http://avepagro.org.ve/agrotrop/v21_6/v216a001.html">http://avepagro.org.ve/agrotrop/v21_6/v216a001.html</a> Carvalho <i>et al.</i> 1997.

**Tabla 2.** Proceso catabólicos que ocurren en el suelo mediados por los organismos, en especial, los microorganismos quienes han innovado todas estas vías metabólicas.

Componentes iniciales y finales del proceso Proceso catabólico	Fuente de materia (sustrato) utilizado en el proceso	Moléculas receptoras de electrones	Grado de Oxidación del C (Productos finales)	Energía (ATP generado)	Liberación de H <sub>2</sub> O por el proceso metabólico
FERMENTACIÓN	Carbohidratos Ácidos orgánicos Proteínas Aminoácidos	Aceptores internos dentro del proceso	alcoholes, ácidos orgánicos + CO <sub>2</sub>	2 ATP	-
RESPIRACIÓN AERÓBICA	Carbohidratos Proteínas Aminoácidos Lípidos Ácidos orgánicos	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	38 ATP	X
	Compuestos inorgánicos de N, Fe, CO, S, Mn...	O <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> Fe <sup>+3</sup> CO <sub>2</sub> S, SO <sub>4</sub> Mn <sup>+4</sup>	ATP	X
RESPIRACIÓN ANAERÓBICA (*)	Carbohidratos Ácidos orgánicos	CO <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> NH <sub>3</sub> NO <sub>3</sub> -NO <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Otros, menos el O <sub>2</sub> Moléculas orgánicas	CO <sub>2</sub> NO <sub>2</sub> NO N <sub>2</sub> S H <sub>2</sub> S HS Ácidos orgánicos más simples Acetato	ATP en pequeña cantidad	-
FOTOSÍNTESIS					
Anoxigénica	CO <sub>2</sub> , Ácidos orgánicos	H <sub>2</sub> S	Azúcares	ATP Se gasta en fase anabólica del proceso	X
Oxigénica	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Azúcares	Idem	X
(*) Este proceso metabólico lo realizan solamente las bacterias.					

Fuente: Coyne 2000, Madigan 1999, Sánchez de P et al. 2000.

como los llamados gases con efecto invernadero (GEI) y otros como el H<sub>2</sub>S y su participación en la lluvia ácida.

En la Tabla 1 se presentan algunos ejemplos de las moléculas orgánicas y minerales que hacen parte integral de diferentes estructuras en los organismos y que regresan en el suelo cuando ocurre la degradación de ellas (catabolismo), para ser luego ensamblados en nuevas moléculas (anabolismo). Algunas de estas moléculas actúan en procesos metabólicos específicos como fuentes de materia (sustratos) y en otras, como receptoras de electrones (Tabla 2).

En esta forma, a través de las redes metabólicas ocurre la construcción y deconstrucción de moléculas que aseguran la vida y el flujo de materia y energía que se desarrollan en el sistema suelo y forman un "continuum" con la troposfera y la atmósfera terrestre.

A pesar de la aparente escasez de "itinerarios bioquímicos", que se repiten universalmente en los ambientes,

al hacerse presentes bucles catalíticos y bifurcaciones nuevas, la biodiversidad se magnifica y expresa en enzimas y biomoléculas en las cuales puede iniciarse el metabolismo de un organismo y/o, por el contrario finalizar. Así, el suelo como sistema viviente se convierte en un caldo enzimático y molecular diverso, variado, de múltiples opciones.

En el patrón de organización del suelo, además de la agregación, las redes metabólicas que aseguran el flujo continuo de nutrientes, no se concentran en organismos específicos, sino que requieren de biodiversidad para que ocurran redes dentro de redes que faciliten la absorción de nutrientes por las plantas, su almacenamiento, la circulación de gases y de agua, la detoxificación, entre otros procesos importantes que definen su carácter de sistema viviente. Lo físico, químico y biológico confluyen para que surjan las propiedades emergentes que aseguran estas condiciones.

### • El suelo vivo es un sistema cognitivo

El flujo continuo de materia y energía, de actividades metabólicas y desarrollo que lleva a que el suelo presente una estructura y organización características, están ligados a aprendizaje y almacenamiento de la información, que permiten que los procesos se repitan, se vuelvan cíclicos y haya respuestas ante cambios en el entorno. La cognición se expresa con fuerza en los organismos, quienes en ese proceso de aprendizaje manifiestan cambios ante las perturbaciones, originan "caminos de creatividad evolutiva" que se graban en el genoma: mutaciones, diferentes formas de recombinación genética y simbiosis, que permiten que la vida se autorregule y autorreproduzca (Capra 2003a).

Dentro del estudio de la ciencia del suelo por departamentos, normalmente, la estructura del suelo, ligada a agregados, poros y movimiento de agua, constituye tema de estudio de la Física del Suelo; el material parental, la disponibilidad de nutrientes y factores que influyen, es tema de la Química y, los organismos, sus manifestaciones y cambios, es el tema objeto de la Biología del Suelo. El enfoque sistémico permite la comprensión y dimensionamiento del suelo como sistema viviente, como un todo y cómo sus características son propiedades que emergen de las redes de interacción de las partes, no explicables por ninguna de ellas (Sánchez de P 2003, Sánchez de P *et al.* 2007).

### APROXIMACIÓN A LA CONCEPTUALIZACIÓN DE CALIDAD, FERTILIDAD, SALUD, RESILIENCIA Y SUSTENTABILIDAD DEL SUELO COMO PROPIEDADES EMERGENTES Y PARTE DE LOS AGROECOSISTEMAS

Recordemos que las propiedades emergentes surgen de la interacción funcional de las partes y ninguno de los componentes aislados las presentan (Capra 2003a). En el estudio del suelo, la fertilidad ha sido considerada como un atributo que se examina, especialmente, a partir de muestras que se recogen en el campo, analizan en laboratorios de química de suelos y que arrojan información sobre disponibilidad de nutrientes. En muchas ocasiones, el rendimiento de las cosechas y su sanidad reflejan poco esta información. Por ello, se han complementado estas variables con el análisis de atributos físicos como la agregación, tamaño de poros, circulación y disponibilidad de agua y aún así, la respuesta es incierta.

La visión sistémica nos acerca a la fertilidad como propiedad emergente que refleja la capacidad del suelo para sostener los cultivos permitiendo que expresen adecuadamente su productividad y que las condiciones de sanidad predominen. La fertilidad sólo puede ser explicada desde lo holístico a partir de la red dinámica que integra lo químico, físico y biológico del suelo, dentro de un entorno y tiempo definidos, teniendo en cuenta que dicha capacidad de sostenimiento es finita.

Pankhurst (1997) recoge el aporte de diferentes auto-

res y propone considerar la salud del suelo en términos de producción de cultivos sanos y nutritivos. La visión del suelo como sistema viviente suma a la salud de las plantas, la salud humana, animal y del planeta, adiciona la seguridad y calidad de los alimentos, del ambiente y la permanencia del suelo en el tiempo.

Podríamos decir que en los últimos treinta años el enfoque sistémico, en la medida que permea la ciencia ha creado la necesidad de hacer replanteamientos en torno a la conceptualización del suelo. Según Pankhurst (1997) la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo incursiona en el concepto de calidad del suelo como atributo que se infiere de sus características y observaciones indirectas sobre compactación, erodabilidad, fertilidad, entre otras. Recogiendo el aporte de diferentes investigadores la conceptualización la calidad del suelo se aproxima a la capacidad que éste tiene para asegurar las condiciones y la disponibilidad de nutrientes requeridos para producir cultivos sanos, nutritivos, que se reflejen en salud y bienestar en forma sustentable a largo plazo, sin impactar los recursos naturales o dañar el ambiente.

La inclusión de los atributos de permanencia y resistencia del suelo al deterioro a largo plazo, como característica clave de la calidad del suelo, involucra la propiedad de resiliencia, planteada por Szabolcs (1994), como resultado del movimiento de masa y energía en el sistema que aseguran su formación permanente y conservación. La resiliencia del suelo incluye todos los procesos que lo habilitan para contrarrestar el estrés, la alteración y garantizan su permanencia y estabilidad (Sánchez de P 2003, Sánchez de P *et al.* 2007).

El concepto de sostenibilidad del suelo aúna distintas propiedades emergentes: la fertilidad, calidad y salud expresadas en productividad y viabilidad económica, mediante un uso eficiente de la materia y energía generadas al interior de los propios agroecosistemas, renovándose a sí mismos, sin comprometer su resiliencia; la dimensión social, en términos de bienestar y calidad de vida de las comunidades establecidas y, la dimensión ambiental, al considerar que sus impactos no causen daños al ecosistema global. Altieri (2010) sostiene que el concepto de sostenibilidad "es útil porque recoge un conjunto de preocupaciones sobre la agricultura, concebida como un sistema tanto económico, como social y ecológico".

### ALGUNAS PRÁCTICAS AGROECOLÓGICAS EN LA CALIDAD DEL SUELO Y BIODIVERSIDAD EN LOS AGROECOSISTEMAS

León (2010) enfatiza en la necesidad de separar la conceptualización de Agroecología y Agricultura Ecológica, pues mientras la primera es ciencia que profundiza en procesos complejos ecológicos y culturales en diversos agroecosistemas, la segunda, aplica a situa-



ciones específicas, la tecnología que surge basada en principios universales de la ciencia.

La actividad agrícola ilustra cotidianamente esta situación. Por ejemplo, podemos aplicar materia orgánica porque hemos observado que los cultivos responden con mayor producción y, la repetición de los efectos benéficos en diversas situaciones, lleva a que se convierta en una práctica adoptada por los agricultores (práctica de Agricultura Ecológica puntual). Sin embargo, avanzar en la comprensión de los procesos que ocurren y que se expresan en beneficios, requiere por una parte, de la sistematización de las condiciones en que ocurre, cuándo, cómo, es decir, a la observación de las características de la tecnología. El entender esos cuándo, cómo y por qué nos conduce ineludiblemente a la comprensión de los principios universales de la ciencia, a las condiciones específicas (procesos ecológicos). Sin embargo, no necesariamente nos conecta con la sociedad, con todas sus connotaciones, y con el ecosistema (Agroecología). Es decir, aplicar la práctica no nos convierte en agroecólogos.

Margulis (en Capra 2003a y 2003b), recaba en que los sistemas vivientes se generan a ellos mismos en condiciones específicas, entonces, la intervención humana ocurre fundamentalmente sobre el entorno. Por ello, la mirada de la ciencia en la búsqueda de comprender los procesos ecológicos y culturales que ocurren en agroecosistemas específicos y la visualización de la intervención a efectuar, debería constituir faro para la práctica agroecológica e insistir en el principio de unidad. Sin embargo, como se ejemplificó, la aplicación de la agricultura ecológica como práctica puede surgir como alternativa a diferentes situaciones técnicas, sin que se generen compromisos con lo cultural y ecosistémico. Así, se pueden aplicar técnicas de Agricultura Ecológica, sin que estemos identificados con los principios de la Agroecología.

De acuerdo con Manuel Castells (en Capra 2003b), la tecnología es mucho más antigua que la ciencia. La construcción de instrumentos y aplicación de procedimientos se extiende a los principios de la especie humana y surge de la observación y del ensayo-error, aún sin un principio que los fundamente.

Desde nuestra visión disciplinaria, nos es más fácil comprender y aportar sobre la práctica agroecológica, en el caso de este artículo, sobre la disciplina de la Biología y manejo del Suelo. Sin embargo, reconocemos la necesidad de la interdisciplinariedad y el diálogo de saberes. En esta medida, las experiencias se suman a otras, se llegan a algunas conclusiones generalizadas que pueden ser pautas de acción en situaciones específicas. Algunas prácticas agroecológicas ligadas íntimamente a la calidad del suelo y a la biodiversidad, en la medida que se repiten han pasado a formar parte de la cultura y se convierten en compromisos sociales. El desarrollo científico que actualmente disponemos, nos brinda los

principios teóricos y las herramientas tecnológicas para comprender, justificar su uso, mejorar, innovar y/o complementar las prácticas agroecológicas y dialogar desde diferentes disciplinas y experiencias.

Aquellos que trabajamos sobre los componentes, podemos hacer algunos aportes tecnológicos y culturales, lo cual aparentemente se repite desde nuestros ancestros hasta la actualidad. Bajo esta perspectiva, afrontamos este acápite. Aunque hacemos énfasis en términos del conocimiento de los beneficios puntuales de una práctica específica sobre la calidad del suelo, es necesario comprender que estos beneficios ó perjuicios tienen un contexto dentro de la complejidad del agroecosistema como un todo. Esto lleva a que las respuestas sean evidentes en algunas condiciones más que en otras, dependiendo del entorno y tienen implicaciones sociales y ecosistémicas.

En primera instancia, debemos reconocer una serie de prácticas culturales que van a influir de una u otra forma sobre la respuesta de la práctica agroecológica aplicada y, de hecho, hacen parte de ella. Por ejemplo, la selección de semillas que se usan, la época de siembra, preparación del suelo, disponibilidad de agua y/o manejo de riego, sistemas de aplicación, áreas sobre las cuales se trabaja, condiciones ambientales, entre muchos otros factores. Vamos a detenernos en los beneficios de algunas prácticas agroecológicas ampliamente investigadas en diferentes latitudes íntimamente ligadas a la calidad del suelo y del agroecosistema.

### **1. Conservación y uso de la materia orgánica en los agroecosistemas**

El uso de la materia orgánica por los agricultores y su conservación se remonta a los inicios de la agricultura, o sea, ha hecho parte de la cultura de los pueblos agrícolas (Gómez y Sánchez 2000, Gómez 2000, Labrador 2001). Sin embargo, durante la aculturización que caracterizó la revolución verde, muchos agricultores la abandonaron y se decidieron por los fertilizantes de síntesis industrial, desconociendo sus costos económicos, sociales y ambientales, pues se generalizó el principio de que sólo aportaban beneficios.

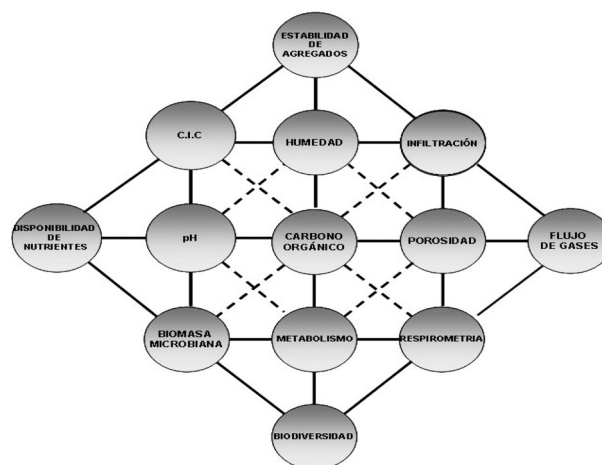
Actualmente, la ciencia nos permite afirmar con certeza que la materia orgánica está íntimamente relacionada con:

- Ciclaje y disponibilidad de nutrientes en el suelo: recordemos que es sustrato clave para el proceso de mineralización y/o solubilización, referidos con anterioridad, para el intercambio catiónico, tiene acción quelatante, acción amortiguadora y forma complejos órgano-minerales (Sánchez *et al.* 2000, Gómez 2000, Gómez y Sánchez 2000, Labrador 2001, Sánchez *et al.* 2007).
- Almacenamiento de agua, no solo como cobertura vegetal que disminuye la evapotranspiración y evaporación, sino también por el agua que se libera du-

- rante la descomposición de la materia orgánica y se retiene en ella. La materia orgánica puede retener hasta 20 veces su peso de agua (Sánchez de P 2003, Sánchez de P *et al.* 2007, Sánchez de P *et al.* 2010).
- Regulación de la temperatura del suelo: Evita los cambios bruscos de temperatura, con mayor razón cuando la convertimos en una cobertura permanente y/o la adicionamos como acolchados, abonos verdes, entre otras (Sanclemente y Prager 2009).
- Cobertura del suelo: En los climas tropicales mediante los policultivos estratificados y la cobertura superficial, el suelo debe protegerse del sol para evitar su calentamiento exagerado (Primavesi 1980, Prager *et al.* 2002).
- Es fuente de humus y almacenamiento de nutrientes a corto, mediano y largo plazo (Gómez Z 2000, Labrador 2001).
- Salud del suelo y del agroecosistema: la materia orgánica al ser fuente de materia y energía para microorganismos genera efectos sobre disponibilidad, diversidad de poblaciones que se regulan a través de interacciones y se equilibran evitando la explosión dañina de algunas de ellas (Sánchez de P 2003, Pérez 2004, Nicholls 2008).
- Favorece la presencia de simbiosis entre las raíces de las plantas y microorganismos para fijación de  $N_2$ , endófitos y micorrizas con sus efectos concomitantes sobre disponibilidad de nutrientes, salud del suelo y rendimiento de los cultivos, (Sánchez de P *et al.* 2007).
- Capacidad tampón del suelo: a través de esta cualidad, ayuda a amortiguar la reacción en el suelo con sus efectos sobre disponibilidad de nutrientes (Gómez Z 2000, Labrador 2001).
- A través de las moléculas que la conforman, de las poblaciones microbianas que la habitan y de la formación de complejos órgano-minerales, contribuye a la agregación del suelo con sus beneficios sobre sus propiedades físicas (Siqueira *et al.* 1994, Sánchez de P 2003, Torres *et al.* 2007).
- Gasto y reserva de energía en el agroecosistema: La presencia de materia orgánica puede incrementar el gasto de C en los agroecosistemas  $q(CO_2)$  y disminuir su reserva húmica, especialmente en sistemas de producción convencionales con alto uso de insumos y maquinaria. Por el contrario, aunque el C se gasta también en sistemas agroecológicos, las pérdidas pueden disminuir e incrementarse su reserva  $q(C)$  como biomasa microbiana, con sus efectos sobre el movimiento del  $CO_2$  como integrante de los gases con efecto invernadero GEI (Sánchez de P 2003, Rojas 2004, Bolaños 2006, Naranjo 2009, Correa 2010).
- Captura de C con regulación de GEI, la materia orgánica viva mediante el proceso de fotosíntesis y las redes tróficas biodiversas ligadas, puede man-

tener cautivo el C dentro del sistema, a través de la materia orgánica no viva, su transformación en humus y almacenamiento en el sistema en términos de materia orgánica estabilizada. Detenida en estos compartimentos la materia orgánica puede permanecer más tiempo en el sistema, demorando su mineralización y liberación como  $CO_2$ , y otros GEI mitigando sus efectos sobre el cambio climático (SEAE 2007, Naranjo 2009, Correa 2010).

Un ejemplo de beneficios de la materia orgánica fresca aplicada, lo constituye la investigación de Sanclemente y Prager 2009, quienes evaluaron el efecto del Frijol terciopelo (*Mucuna pruriens*) como abono verde o acolchado orgánico más un complemento de fertilización, sobre algunas propiedades físicas, químicas y biológicas de un suelo *Typic Haplustalfs* cultivado con maíz *Zea mays* L, en zona de ladera del Valle del Cauca (Colombia). La Figura 6 ilustra la compleja red de interacciones que se tejen entre algunas características del suelo después de la aplicación de la práctica agroecológica: adición de una leguminosa como abono verde y/o como acolchado. La necromasa producida *in situ* y aportada (4.8 t/ha de materia seca) incrementó el contenido de carbono orgánico total, lo cual a su vez generó cambios en red sobre otras propiedades del suelo.

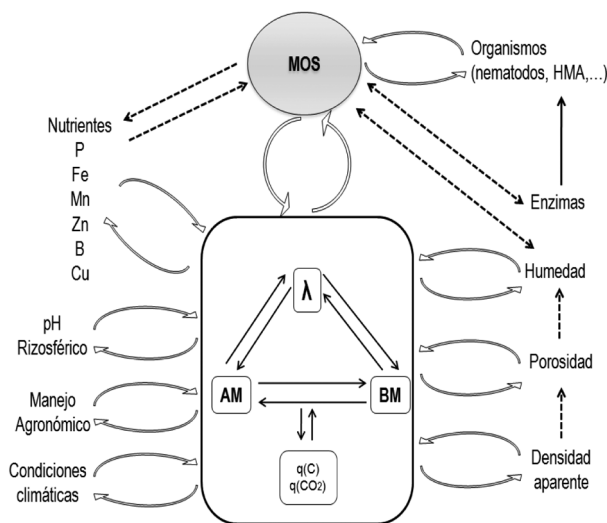


**Figura 6.** Red de interacciones entre algunas propiedades del suelo *Typic Haplustalfs*. Efecto encontrado con el aporte de materia orgánica mediante el uso de *Mucuna pruriens*, como tecnología alternativa de abonamiento de maíz (*Zea mays* L.), en suelos de ladera del Valle del Cauca (Colombia). El esquema fue elaborado a partir del análisis de correlación entre las variables observadas. ( $p < 0.1$ ). Fuente: (Sanclemente y Prager 2009).

En investigación adelantada durante tres años en el norte del Valle del Cauca (Colombia) se monitoreó los cambios que sufrían los suelos bajo sistemas de agricultura convencional, en transición y agricultura agroecológica (Sánchez de P 2003). El cultivo objeto fue el maracuyá (*Passiflora edulis* var. *flavicarpa*). Los suelos se interrogaron desde diferentes variables, con énfasis en

actividad microbiana del suelo monitoreada a través de la respiración ( $C-CO_2$ ), la biomasa microbiana (BM) y la conductividad térmica ( $\lambda$ ).

Este estudio se complementó con el análisis de algunas variables químicas, físicas y biológicas (nematodos, micorrizas, arvenses). Las correlaciones analizadas bajo enfoque sistémico permitieron conectar diferentes hilos de la red que se teje en torno a las respuestas (Fig. 7), cuyas explicaciones surgen de la complejidad de las conexiones entre las características físicas, químicas y biológicas de los suelos estudiados y prácticas de manejo en los agroecosistemas.



**Figura 7.** Interpretación bajo enfoque holístico de las interacciones de la actividad biológica en rizosfera de maracuyá con algunas características del suelo, en diferentes sistemas de manejo (Sánchez de P 2003). Las líneas enteras representan las relaciones encontradas a través de la estadística y las líneas punteadas, aquellas basadas en la fundamentación.

Las líneas enteras representan las relaciones encontradas a través de la estadística y las líneas punteadas, señalan aquellas basadas en la fundamentación aportada por la ciencia. Ambas nos ilustran la cascada de conexiones que ocurren en torno a variables sencillas como conductividad térmica ( $\lambda$ ), respiración microbiana (AM), biomasa microbiana (BM). Todas estas variables brindan información parcial con respecto a la calidad del suelo y otras cualidades del agroecosistema como productividad y sanidad (Rojas *et al.* 2006, Sánchez de P *et al.* 2010).

## 2. Labranza mínima o cero

El uso de estas tecnologías busca reducir las prácticas de laboreo del suelo y se logren beneficios como:

- Acumulación superficial de la materia orgánica (Prager *et al.* 2002).

- Disminución de pérdidas de nutrientes por vías como la lixiviación, arrastre, volatilización, entre otros. Dada su relación con la dinámica de la materia orgánica y de los minerales del suelo, movimiento de agua y por ende, de nutrientes (Zapata *et al.* 2007).
- Menor gasto de carbono por respiración y mayor captura como biomasa.
- Conservación de la agregación del suelo y disminución de la compactación.
- Disminución de pérdidas de humedad e incrementos en la temperatura del suelo.
- Disminución de pérdidas de suelo por procesos erosivos de diferente índole.
- Menor gasto de la materia orgánica fresca y estabilizada (Primavesi 1980, Prager *et al.* 2002).

En estudios llevados a cabo por Cadavid *et al.* 1998 y Gómez *et al.* 2007, en yuca *Manihot esculenta* Mill, en Pivijay (Departamento del Magdalena, Colombia), se encontró que en suelos arenosos, la práctica continuada durante ocho años de cero labranza y adición de los residuos de cosecha y arvenses donde predominaban las gramíneas, triplicó los rendimientos del cultivo y mejoró varias características químicas, físicas y biológicas en estos suelos.

## 3. Biodiversidad

La biodiversidad hace referencia a la comunidad de especies vegetales, animales y microorganismos (macro, meso y microbiota) que conviven e interactúan dentro de un ecosistema y/o agroecosistema (Primavesi 1980, Prager *et al.* 2002). Sarandón (2010) sostiene: “No hay dudas de que la conservación y el uso sostenible de la biodiversidad son uno de los desafíos más importantes que tiene que afrontar la humanidad en estos tiempos”.

Desde el punto de vista de prácticas agroecológicas a través de las cuales se tiene que afrontar este reto, los principios fundamentales de la Agroecología, nos muestran dos sentidos en el actuar: diversidad genética de especies y diversidad de materiales dentro de la misma especie, ambos de gran importancia dentro del manejo de la biodiversidad aérea y subterránea (Sarandón 2010, Nicholls 2010, Prager *et al.* 2002).

En este punto regresamos a la introducción de este escrito y a los dos pilares esbozados por Altieri (2010), sobre los cuales hay que trabajar con miras al cambio de los sistemas convencionales hacia sistemas agroecológicos: La calidad del suelo, y la biodiversidad arriba y abajo del suelo, en espacio y tiempo, pilares considerados por los autores como componentes inseparables dentro del enfoque sistémico.

### 1. La conexión abajo - arriba

La biodiversidad que se expresa arriba de un agroecosistema complejo, tiene su expresión abajo, en

el suelo, en diversidad de rizosferas<sup>2</sup> de las especies que coexisten, se entrelazan, entretejen, alternan, superponen, ascienden y/o combinan, formando un entramado que influye en:

- Disponibilidad permanente de nutrientes, gracias a la diversidad de moléculas de diferente origen, con tasas de mineralización diferentes que aseguran un suministro pausado y continuo de nutrientes.
- Sistemas radicales con diferente arquitectura, que cambian a ritmos distintos y hace que algunas rizosferas sean superficiales y otras profundas, y así se pueda explorar el suelo a diferentes profundidades.
- Sanidad del agroecosistema basado en diversidad de opciones alimentarias que permiten que coexistan plaga y control a nivel del suelo y aéreo (Pérez 2004, Nicholls 2008).
- Generación de biomoléculas que hacen la función de comunicación y de defensa a diferentes niveles en el suelo y a nivel aéreo (metabolismo secundario de los organismos).
- Acumulación de material orgánico en la medida que las rizosferas crecen, se desarrollan y mueren, dejando disponible sus rizodeposiciones y toda su corporeización.
- Presencia de relaciones íntimas (simbiosis, asociaciones) que tornan más eficiente la circulación de nutrientes limitantes en el suelo como el nitrógeno (simbiosis leguminosa - rizobios, plantas de diferentes especies - bacterias fijadoras de  $N_2$ ), micorrizas (en sus diferentes expresiones, endo y ectomicorrizas) y endófitos (Sánchez de P *et al.* 2007).
- La circulación de agua y regulación de temperatura que permite disponibilidad de este elemento, vía almacenamiento del agua proveniente de precipitación, el riego y la mineralización de la materia orgánica, con su influencia regulatoria de la temperatura, disponibilidad y movilidad de nutrientes<sup>3</sup>.

## 2. La conexión arriba-abajo

La biodiversidad dentro del sistema complejo, en la parte aérea adquiere otras manifestaciones:

- 2 Odum (1995) las describe como "esteras de raíces que penetran en el humus superficial y recuperan con rapidez los nutrientes de las hojas secas antes de que éstas sean arrastradas por el agua o el aire. Al parecer estas raíces entrelazadas también inhiben las actividades de bacterias desnitrificantes, bloqueando de este modo la pérdida de nitrógeno al aire....." En los últimos quince años ha habido un intenso desarrollo investigativo sobre la rizosfera de las plantas (Marschner 1995, Hinsinger 1998, Sánchez de P 2007b).
- 3 "En los suelos se almacena el 40% de toda el agua dulce del planeta" (Díaz 2005).

- Plantas con períodos de renovación diferentes, que significan también aportes de materiales orgánicos con variadas tasas de descomposición en épocas y espacios.
- Filosferas con distintas arquitecturas que protegen el suelo y al ambiente contra la desecación, regulan la temperatura y humedad del ambiente.
- Redes tróficas complejas que dan albergue a organismos con diversos papeles funcionales, quienes equilibran la sanidad del agroecosistema en su parte aérea, pero también abajo pues muchos de dichos organismos pasan alguna fase de su vida en el suelo.
- Materiales vegetales con tolerancia a un rango amplio de razas de un patógeno, por ejemplo Altieri y Nicholls (2004) sostienen que "una mayor diversidad de plantas implica una mayor diversidad de herbívoros.... de depredadores y parásitos". En esta forma la biodiversidad... puede asegurar la optimización de procesos ecológicos claves y el funcionamiento de los agroecosistemas" (Sánchez de P y Prager 2001, Pérez 2004, Nicholls 2010).
- Flujo permanente de materia y energía a través del proceso de fotosíntesis y redes alimentarias y sanitarias ligadas a las plantas, circulación interna y externa de moléculas (Sánchez de P 2007a, Pérez 2004, Nicholls 2010).
- Presencia de relaciones permanentes o temporales que tornan más eficiente la circulación de nutrientes limitantes en el suelo como el nitrógeno (filosfera, asociaciones en tallos, ramas, hojas y frutos) y, la sanidad de las plantas a través de relaciones antagónicas, sinérgicas y otras expresiones entre diferentes integrantes del agroecosistema (Nicholls 2010).

## 4. Organización de agroecosistemas complejos:

- Íntimamente ligados a biodiversidad que incluye no sólo vegetales sino también el componente animal, y contempla especialmente arreglos espaciales en los cuales se privilegia, por ejemplo, la posibilidad de uso de algunas especies como rompevientos, albergadores de poblaciones de insectos herbívoros, predadores, parásitos, coberturas vegetales temporales y permanentes que puedan ser incorporadas como acolchados orgánicos y abonos verdes, albergadoras de fijadores de  $N_2$ , de micorrizas, endófitos; especies nativas y o adaptadas, resistentes a sequía, quemadas, estreses nutricionales, insectos, repelentes, entre otros; espacios sin intervenir como hábitat especial y corredores de vida silvestre, entre otros (Prager *et al.* 2002, Nicholls 2010, Sarandón 2010, Vásquez 2010).
- Prager *et al.*, 2003 plantean la diversificación como eje conductor en la agricultura ecológica y agregan los siguientes elementos de justificación a su adopción: son de amplia adaptación al medio físico natural, dis-



minuyen riesgos agronómicos, disminuyen riesgos económicos, reactivan la economía local, contribuyen a la seguridad y soberanía alimentaria, integran la familia, conservan el ambiente, aseguran sostenibilidad del suelo, generan equilibrio (homeóstasis) y sanidad, son sistemas sostenibles, enriquecen el paisaje, constituyen opción productiva para agricultores ecológicos, pueden ser adoptados por grandes y pequeños agricultores, disminuyen el control de arvenses, somborean el suelo, suministran productos adicionales como leña, forraje, plantas medicinales, de ornamentación y se expresan en bienestar.

### **CALIDAD DEL SUELO, BIODIVERSIDAD ARRIBA Y ABAJO, SOBERANÍA Y SEGURIDAD ALIMENTARIAS**

La Agroecología como ciencia nos permite comprender los principios de funcionamiento de la Agricultura Ecológica y de sus prácticas muchas de ellas dirigidas, si no todas, a asegurar y conservar la calidad del suelo como bien finito e íntimamente ligado al bienestar social, económico y ecosistémico y que nos permiten establecer principios como:

- La diversidad genética asegura la dinámica de las redes de materia y energía, la formación de distintas biomoléculas que permiten el flujo de información, la comunicación y la autorregulación (homeóstasis) en los agroecosistemas. La diversidad genética en la parte aérea del agroecosistema está directamente ligada a diversidad genética abajo, se expresa en la calidad del suelo y viceversa.
- Esta diversidad genética se logra a través de la siembra y/o conservación de distintos materiales de la misma especie y de diversas especies: plantas, animales, microorganismos, que comparten un mismo suelo y están generalmente, en distintos estratos aéreos y subterráneos, ya sea de manera simultánea como también en diferentes épocas del año. Combinan diferentes cualidades que permiten sinergias y complementariedades dentro de los agroecosistemas.
- La diversidad genética arriba y abajo del agroecosistema se expresa inicialmente a nivel de finca y es necesario que trascienda a nivel local y regional. Lo regional lleva a la caracterización espacial de productos locales y especiales, al permanente suministro de alimentos en diferentes épocas del año, a la expresión cultural de soberanía, ligada al alimento, su preparación y consumo. Igualmente a la autonomía, fruto de la seguridad alimentaria, expresada en que los agricultores tengan provisión interna de alimento permanente, para ellos y la comunidad local, inicialmente, sin depender de los altibajos del mercado externo y de la capacidad de compra.

- La calidad del suelo unido a la biodiversidad son temas que nos ocupan como especie humana, pues las prácticas agresivas sobre estos componentes agotan cada vez más la capacidad de resiliencia de los agro y ecosistemas. Las manifestaciones de los disturbios se expresan en fenómenos como el cambio climático con sus graves consecuencias ecosistémicas y sobre el bienestar y supervivencia de los sistemas vivientes. Prácticas agroecológicas como las esbozadas en este escrito, aunadas a otras, pueden contribuir a la mitigación del cambio climático, al bienestar social y ecosistémico (SEAE 2007, Altieri y Nicholls 2008).

### **La necesidad de trascender el nivel de finca y avanzar hacia lo local, regional y territorial.**

- En varias ocasiones hemos tenido oportunidad de visitar fincas en las cuales los agricultores y agroecosistemas reflejan el uso adecuado de las prácticas de Agricultura Ecológica y la convicción en sus principios. Sin embargo, a algunos metros o kilómetros de ellas, encontramos agricultores con prácticas convencionales (uso de quemadas, toda la gama de productos industriales de síntesis química, monocultivos, sistemas de labranza agresivos con el medio, entre otros) que nos hacen conciencia de la necesidad de trascender el nivel de finca y avanzar hacia lo local, regional y territorial.
- A nivel local, requiere el trabajo colectivo de puesta en común de intereses y compromisos puntuales. Al nivel regional y territorial, la situación es más compleja pues requiere de un compromiso político, social y económico que debe expresarse en voluntades políticas, pero sobre todo, en acciones concertadas. Requiere de compromisos institucionales, gubernamentales que deben ser presionados por la sociedad, a través de redes tejidas entre lo urbano y lo rural, en las cuales se reconozca la necesidad de lo rural para asegurar la soberanía y seguridad alimentarias.
- Al alcanzar el nivel de lo regional y territorial, la Agroecología adquiere su tercera dimensión: la de movimiento social y político (Barrera y Prager 2008, Altieri 2009, Sanclemente *et al.* 2009, Rosset *et al.* 2010).

### **Agradecimientos**

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Colombia por brindarles el espacio y tiempo para reflexionar sobre el tema; a los pensadores sistémicos, varios de ellos mencionados en el texto, quienes nos han enriquecido con una nueva visión de la ciencia que abre aún más espacios a la Agroecología y, a los Profesores pensionados José Carlos Miranda y Gustavo Reyes por colaborarnos con generosidad.



## Referencias

- Altieri MA, Nicholls CI. 2004. Biodiversity and pest management in agroecosystems, 2ª Edición, Nueva York, Haworth Press, 236p.
- Altieri MA, Nicholls CI. 2008. Los impactos del cambio climático sobre las comunidades campesinas y de agricultores tradicionales y sus respuestas adaptativas. Universidad de Murcia. Revista Agroecología 3:7-24.
- Altieri MA. 2009. Las pequeñas fincas como un activo ecológico planetario: Cinco razones por qué revitalizar las pequeñas fincas en el sur global. Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira. Boletín Agroecológico 7:2-4.
- Altieri MA. 2010. El estado del arte de la agroecología: Revisando avances y desafíos. En Vertientes del pensamiento agroecológico: fundamentos y aplicaciones (León ST, Altieri MA, eds.). Medellín: Instituto de Estudios Ambientales IDEA - Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología SOCLA, pp 77-104.
- Barrera MN, Prager MM. 2008. Seguridad alimentaria y nutricional en Colombia. Políticas, acciones e indicadores. La función de la Universidad. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. Boletín Agroecológico, 6:2-4.
- Bolaños BM. 2006. Actividad enzimática (deshidrogenasa, proteasa, celulasa, fosfatasa y arilsulfatasa) en suelo rizosférico de plátano (*Musa AAB*): Relación con propiedades de un Andisol. Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. Tesis Doctoral. Ciencias Agropecuarias.
- Cadavid LF, El-Sharkawy MA, Acosta A, Sánchez T. 1998. Long-Term effects of mulch, fertilization and tillage on Cassava grown in sandy soils in northern Colombia. Field Crops Research. 57:45-56.
- Carvalho MM, Silva JL, Campos JB. 1997. Produção de matéria seca e composição mineral de seis gramíneas tropicais estabelecidas em um sub-bosque de angico-vermelho. Revista Brasileira de Zootecnia. 26:213-218.
- Capra F. 2003a. La trama de la vida. Una nueva perspectiva de los sistemas vivos. Barcelona: Quinta edición, Anagrama, Colección Argumentos.
- Capra F. 2003b. Las conexiones ocultas. Implicaciones sociales, medio-ambientales, económicas y biológicas de una nueva visión del mundo. Barcelona: Anagrama.
- Coyne MS. 2000. Microbiología del suelo: Un enfoque exploratorio. Madrid: Editorial Paraninfo.
- Correa YR. 2010. Estudio preliminar de la capacidad de un suelo para retener Gases con efecto invernadero (GEI) en un ciclo de maíz (*Zea mays* L.) bajo abonos verdes. Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. Tesis Pregrado. Ingeniería Ambiental.
- Díaz D. 2005. Sistema agua. Colombia: Corporación Semillas de Agua.
- Gómez ZJ. 2000. La materia orgánica en los agroecosistemas. Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira.
- Gómez ZJ, Sánchez de PM. 2000. El proceso de descomposición de residuos vegetales. Cuaderno de microbiología No. 10. Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira.
- Gómez LE, Sánchez de PM, El-Sharkawi M, Cadavid LF. 2007. Algunos indicadores de actividad biológica en el suelo y su relación con el manejo agronómico de la yuca *Manihot esculenta* Crantz en la costa norte de Colombia. Micorriza arbuscular en agroecosistema. En Las endomicorrizas: Expresión bioedáfica de importancia en el trópico (Sánchez de P *et al.*, eds.). Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, pp 179-193.
- Hinsinger P. 1998. How do plant roots acquire mineral nutrients? Chemical processes involved in the rhizosphere. Advances in Agronomy 64:225-265.
- Labrador MJ. 2001. La materia orgánica en los agroecosistemas. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- León ST. 2010. Agroecología: desafíos de una ciencia ambiental en construcción. En Vertientes del pensamiento agroecológico: fundamentos y aplicaciones (León ST, Altieri MA, eds.). Medellín: Instituto de Estudios Ambientales IDEA - Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología SOCLA, pp 53-76.
- Madigan MT, Martinko JM, PARKER J. 1999. Brock. Biología de los microorganismos. Octava edición. Madrid: Prentice.
- Marschner H. 1995. Mineral nutrition of higher plants, 2th ed. London: Academic Press.
- Naranjo SR. 2009. Efecto del uso de vinazas sobre la emisión de CO<sub>2</sub> desde comunidades microbianas asociadas a un suelo molisol del Valle del Cauca. Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. Tesis Pregrado. Ingeniería Ambiental.
- Nicholls EC. 2008. Control biológico de insectos: Un enfoque agroecológico. Colombia: Universidad de Antioquia.
- Nicholls CI. 2010. Bases agroecológicas para diseñar e implementar una estrategia de manejo de hábitat para control biológico de plagas. En Vertientes del pensamiento agroecológico: fundamentos y aplicaciones (León ST, Altieri MA, eds.). Medellín: Instituto de Estudios Ambientales IDEA - Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología SOCLA, pp 203-225.

- Odum E. 1995. Ecología: Peligra la vida. Segunda edición. México: Interamericana McGraw-Hill.
- Pankhurst CE. 1997. Biodiversity of soil organisms as an indicator of soil health. In Biological indicators of soil health (Pankhurst CE, Doube SM, Gupta VV, eds). Cab International, pp 297-323
- Patiño TC. 2010. Solubilización de fosfatos por poblaciones bacterianas de un suelo del Valle del Cauca. Análisis genético y de biodiversidad. Tesis Doctoral.. Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira. 89p.
- Pérez CN. 2004. Manejo ecológico de plagas. San José, La Habana, Cuba: Centro de Estudios de Desarrollo Agrario y Rural – CEDAR, Universidad Agraria de la Habana.
- Prager MM, Restrepo MJ, Ángel SD, Malagón R, Zamorano A. 2002. Agroecología. Una disciplina para el estudio y desarrollo de sistemas sostenibles de producción agropecuaria. Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Impresora Feriva.
- Prager MM, Victoria TJ, Sánchez de PM, Gómez LE, Zamorano MA. 2003. Sistemas diversificados de producción. Cuadernos ambientales N° 10. Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Instituto de Estudios Ambientales - IDEA- Palmira, Pronatta, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Primavesi A. 1980. Manejo ecológico de suelo. La agricultura en regiones tropicales. Buenos Aires: Librería El Ateneo.
- Reyes JT, Barrios E, Sánchez de PM. 2007. Micelio externo de HMA asociado a barbechos mejorados y su participación en la agregación de suelos del Cauca. En Las endomicorizas: Expresión bioedáfica de importancia en el trópico (Sánchez de P *et al.*, eds.). Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, pp. 262-276.
- Rincón AM, Vásquez AM, Padilla FC. 2005. Composición química y compuestos bioactivos de las harinas de cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*), mandarina (*Citrus reticulata*) y toronja (*Citrus paradisi*) cultivadas en Venezuela. Archivos Latinoamericanos de Nutrición. Vol. 55 – Núm. 3. Consultado 17 de febrero de 2011.
- [http://www.alanrevista.org/ediciones/2005-3/composicion\\_quimica\\_bioactivos\\_harinas\\_naranja\\_mandarina\\_toronja.asp](http://www.alanrevista.org/ediciones/2005-3/composicion_quimica_bioactivos_harinas_naranja_mandarina_toronja.asp)
- Rojas PA. 2004. Evaluación de la conductividad térmica del suelo y su relación con la materia orgánica, actividad y biomasa microbianas en cultivos agroecológico y convencional de maracuyá (*Passiflora edulis* var. *Flavicarpa*) en el municipio de Toro (Valle del Cauca). Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. Trabajo de Grado. Ingeniería Agrícola.
- Rojas PA, Sánchez de PM, Zúñiga EO, Pérez J, Gascó JM. 2006. Actividad y biomasa microbiana como indicadores de gasto y acumulación de materia orgánica en cultivos agroecológico y convencional de maracuyá (*Passiflora edulis* Sims. var. *Flavicarpa*) en el municipio de Toro (Valle del Cauca). Revista Acta Agronómica. 55(4):7-12.
- Rosset P, Ávila DN. 2010. Causas de la crisis global de los precios de alimentos, y la respuesta campesina. En Vertientes del pensamiento agroecológico: fundamentos y aplicaciones (León ST, Altieri MA, eds.). Medellín: Instituto de Estudios Ambientales IDEA - Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología SOCLA, pp 131-137.
- Sánchez de PM, Marmolejo F, Bravo N. 2000. Microbiología. Aspectos fundamentales. Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira.
- Sánchez de PM, Prager M. 2001. Nociones fundamentales para el manejo ecológico de problemas fitosanitarios. Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Pronatta, Ministerio de Agricultura. Impresora Feriva.
- Sánchez de PM. 2003. Actividad biológica en la rizosfera del maracuyá (*Passiflora edulis* Var. *Flavicarpa*) en diferentes sistemas de manejo, estados de desarrollo y en condiciones fitosanitarias. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Superior de Ingenieros Agrónomos. Tesis Doctoral.
- Sánchez de PM. 2007a. El suelo principio y fin de la vida sobre la tierra. En Las endomicorizas: Expresión bioedáfica de importancia en el trópico (Sánchez de P *et al.*, eds.). Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, pp 31-61.
- Sánchez de PM. 2007b. La rizosfera: estrategia de colonización del suelo. En Las endomicorizas: Expresión bioedáfica de importancia en el trópico (Sánchez de P *et al.*, eds.). Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, pp 84-114.
- Sánchez de PM, Gómez LE, Muñoz FJ, Barrios E, Prager MM, Bravo ON, El-Sharkawi M, Pérez SJ, Asakawa N, Marmolejo de la TF, Cadavid L, Quintero DR, Miranda VJ, Mier C, Torres R, Trinidad RJ, Zapata C, Tofiño R, Benjumea C, Díaz G, Trujillo L, Bonilla F, Espinosa J, Rodríguez RH, García H, Triana F, Carlosama OC, Vargas N. 2007. Las Endomicorizas: Expresión bioedáfica de importancia en el trópico. Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira.
- Sánchez de PM, Prager MM, Ángel SD, Sarria BP. 2010. Indicadores de sostenibilidad con enfoque agroecológico en agroecosistemas tropicales. En Vertientes del pensamiento agroecológico: fundamentos y aplicaciones (León ST, Altieri MA, eds.). Medellín: Instituto de Estudios Ambientales IDEA - Universidad Nacional de Colombia Sede

- Bogotá, Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología SOCLA, pp 247-269.
- Sanclemente RO, Prager MM. 2009. Efecto del cultivo de cobertura: *Mucuna pruriens*, en algunas propiedades físicas, químicas y biológicas de un suelo *typic haplustalfs*, cultivado con maíz (*Zea mays* L.) En zona de ladera del municipio de Palmira, Valle. Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. Tesis Maestría. Ciencias Agrarias, Énfasis Suelos.
- Santana C, Segura D, Sánchez S. 1994. Síntesis, función y origen evolutivo de los Metabolitos secundarios producidos por microorganismos. Revista Latinoamericana de Microbiología. 36:13-158.
- Sarandón SJ. 2010. Biodiversidad, agrobiodiversidad y agricultura sustentable. Análisis del Convenio sobre Diversidad Biológica. En Vertientes del pensamiento agroecológico: fundamentos y aplicaciones (León ST, Altieri MA, eds.). Medellín: Instituto de Estudios Ambientales IDEA - Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología SOCLA, pp 105-129.
- SEAE. 2007. Contribución de la agricultura ecológica a la mitigación del cambio climático. En comparación con la agricultura tradicional. España: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación MAPA, Sociedad Española de Agricultura Ecológica SEAE.
- Siqueira JO, Moreira FM, Grisi BM, Hungria M, Araujo RS. 1994. Microorganismos e processos biológicos do solo. Brasília. Perspectiva ambiental: Embrapa Brasília.
- Szabolcs I. 1994. The concept of soil resilience. In Cab International. Soil resilience and sustainable land use (Greenland DJ, Szabolcs L, eds.). Wallingford, Pp 33-39.
- Tisdall JM, Oades JM. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. Journal of Soils Science. 33:141-163.
- Torres LR, Barrios E, Sánchez de PM. 2007. El papel del micelio externo de HMA asociado a barbechos mejorados en suelos degradados de Pescador - Cauca. En Las endomicorizas: Expresión bioedáfica de importancia en el trópico (Sánchez de P *et al.*, eds.). Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, pp 251-261.
- Vásquez M, Luis L. 2010. Agricultores experimentadores en agroecología y transición de la agricultura en Cuba. En Vertientes del pensamiento agroecológico: fundamentos y aplicaciones (León ST, Altieri MA, eds.). Medellín: Instituto de Estudios Ambientales IDEA - Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología SOCLA, pp 227-246.
- Zapata MJ, Sánchez de PM, Azakawa NM. 2007. Actividad biológica en suelos con diferentes grados de intervención en el Ecoparque Cerro de La Bandera. En Las endomicorizas: Expresión bioedáfica de importancia en el trópico (Sánchez de P *et al.*, eds.). Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, pp 240-250.